无人机农林业应用全球研究态势分析

陈梅香[1,2,3]，张瑞瑞[1,2,3]，陈立平[1,2,3*]，唐　青[1,2,3]，夏　浪[1,2,3]

（1. 国家农业智能装备工程技术研究中心，北京 100097；2. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097；3. 国家农业航空应用技术国际联合研究中心，北京 100097）

摘　要：无人机具有作业效率高、地形适应性好等独特优势，近年在农林业中应用范围不断扩大，相关研究成果数量呈快速上升式发展。为掌握无人机农林应用全球研究态势，本研究采集2011—2020年期间Web of Science核心合集数据库中无人机农林应用全球研究相关文献数据，利用VOSviewer等统计软件对文献进行科学计量分析。分析结果表明，自2017年开始，无人机农林业应用研究发文数量快速增加，全球已有94个国家/地区、1778个机构开展了研究；发文量排名前三位的国家依次是美国、中国和澳大利亚，表明这三个国家从事无人机农林业应用的科研实力强，学术影响力大；共有398种期刊发表了有关无人机农林业应用研究文章，约占全部收录期刊的1.90%，说明更多的期刊开始关注无人机农林业应用研究；发文最多的期刊是由MDPI主办的*Remote Sensing*；被引次数最多的文章内容主要是关注无人机系统在摄影测量和遥感上的传感、导航、定位和通用数据处理等的研究现状。此外，对无人机农林业应用研究热点进行分析发现，无人机施药、无人机病虫害遥感、植物表型获取是无人机农林业应用的主要研究热点。本研究可为无人机在农林业上的创新研究、科研团队之间的合作提供参考。

关键词：无人机；Web of Science；文献计量；VOSviewer；研究态势；遥感；植物表型

中图分类号：S252　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202107-SA006

引用格式：陈梅香，张瑞瑞，陈立平，唐青，夏浪．无人机农林业应用全球研究态势分析[J]．智慧农业(中英文)，2021，3(3)：22-37.

CHEN Meixiang, ZHANG Ruirui, CHEN Liping, TANG Qing, XIA Lang. Investigation on advances of unmanned aerial vehicle application research in agriculture and forestry[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 22-37. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

无人机（Unmanned Aerial Vehicle，UAV）早期应用于军事领域，随着无人机飞控、导航等技术研究的深入，无人机逐渐从军事领域转向应用范围广泛的民用领域，并触发了学术界的研究热潮[1]。农林无人机主要由飞行平台、作业管理与监控系统、机载配置等组成。机载配置主要有航空喷洒作业设备和遥感图像获取装备等，是涉及到航空飞行器、信息技术、流体力学、图像处理、植保等多技术交叉融合的复杂作业系统[2]，突破了传统地面机械作业存在的局限性，具有作

收稿日期：2021-07-16　修订日期：2021-09-07

基金项目：国家自然科学基金（31971581）；北京市农林科学院创新能力建设专项（KJCX20200206）；北京市农林科学院创新能力建设专项（KJCX20200432）

作者简介：陈梅香（1971—），女，博士，副研究员，研究方向为病虫害自动监测与防控。E-mail：chenmx@nercita.org.cn。

*通讯作者：陈立平（1973—），女，博士，研究员，研究方向为农林业智能装备技术。电话：010-51503425。E-mail：chenlp@ nercita.org.cn。

业效率高、复杂地形适应性强、操作人员安全、劳动力投入成本低等独特优势[3]，无人机在农林业上的应用主要包括植保作业[4,5]、信息采集[6]、监测预警[7]等。近年来无人机在农林业上的应用呈现井喷趋势[3]，已成为现代农林业的新兴产业。日本山叶公司（YAMAHA）于1990年推出世界上第一架用于喷洒农药的无人机“R50”，此后，植保无人机在日本农业应用发展迅速，截至2018年5月，日本在农业应用的无人机市场装机容量为2788架、无人机操作人员达10,545人[8]。中国从2008年开始出现无人机应用于农业的研究，近十多年来发展迅速，截至2019年，生产无人机的工厂达200多家，主要厂家有大疆、极飞以及汉和等[9]。2019年10月，中国仅植保无人机保有量达5.5万余部，作业面积3千万公顷，无人机装备总量、作业面积都居全球第一[10]。无人机在水稻[11-14]、小麦[15-19]、甘蔗[20,21]、玉米[22-25]、棉花[26,27]、柑橘[28-30]、松树[31,32]等病虫害防治上应用广泛。

文献计量学研究是采用数学与统计学等定量方法对文献特征进行分析和处理的研究，可以评价、预测科学技术的研究现状与发展趋势，体现国家、研究机构等的学术影响力，反映出当前学科的研究现状和前沿。常用的文献计量软件有VOSviewer、CiteSpace和CitNetExplorer等[33]。VOSviewer是由荷兰莱顿大学Van Eck和Waltman博士[34]联合开发的一款文献计量分析和科学知识可视化软件，该软件可进行合作分析、关键词共现分析、共被引分析、文献耦合分析等，并可将其结果进行可视化展示。本研究基于Web of Science核心合集数据库，以文献计量学分析为基础，采用VOSviewer软件、WoS分析工具和Microsoft Excel软件结合对数据进行分析，获取无人机农林业应用全球研究态势，主要包括发展历程、国家/地区影响力、技术领域分布、研究机构影响力、发文期刊以及研究热点、特点和不足等进行分析，为促进中国无人机农林业应用研究提供参考。

2 数据来源与分析方法

选取美国科学情报研究所ISI（Institute for Scientific Information）开发的Web of Knowledge信息检索平台（https：//www.webofscience.com/wos/alldb/basic-search）的Web of Science核心合集数据库作为本研究的样本数据来源。Web of Science[35]（WoS）是一个大型、综合性、多学科的科学引文索引数据库，WoS核心合集是WoS的核心内容，由科学引文索引（Science Citation Index-Expanded™，SCI-E）、社会科学引文索引（Social Sciences Citation Index™，SSCI）、艺术与人文引文索引（Arts & Humanities Citation Index™，AHCI）、会议论文引文索引（Conference Proceedings Citation Index™，CPCI）、图书引文索引（Book Citation Index™，BKCI）和新源索引（Emerging Sources Citation Index™，ESCI）6个引文索引库及化学反应数据库（Current Chemical Reactions™）、化合物索引（Index Chemicus™）2个化学索引库组成包括共收录了21,000多种世界权威、高影响力的学术期刊。WoS是国际上公认的对文献进行科学统计与评价的主要检索、分析工具，其收录文章的状况是评价国家、研究机构、科研人员的科研影响力的重要依据之一[36]。

本研究检索式为TI=（UAV OR unmanned OR helicopter OR Drone OR aerial） AND TS=（"aerial spray" OR "plant protection" OR "crop protection" OR "aerial application" OR "aerial spraying" OR "plant spraying" OR "crop spraying" OR "pesticide" OR "deposition" OR "drift" OR "deposit" OR "remote sensing" OR phenotype OR phenotyping） AND ALL=（plant OR tree OR field OR vegetable OR food OR forestry OR farmland OR agriculture OR fruit OR agricultural OR pesticide OR insect OR pest OR disease OR disease and pest），检索年度为2011—2020年，检索时间为2021年7月7日。共检索到文献1508篇，其中研究技术文章1464篇、研究综述44篇。

基于VOSviewer聚类图节点大小表示发文数

量，颜色代表不同的聚类，按时间顺序用红、绿、蓝、黄等颜色显示，其中红色代表最早从事无人机在农林业领域研究的机构/国家。

期刊分析数据来源于ISI Web of Knowledge 2020版的期刊引证报告（Journal Citation Reports，JCR）。

3 结果与分析

3.1 近十年发展历程

文献的年度分布状况可以直观地展示学科领域的产生、发展与成熟过程，对了解和把握研究领域的发展历程与规律具有重要意义[37]。2011—2020年期间，与无人机应用于农林业的相关文献共1508篇，发文量总体呈现增长的趋势，年度发文量见图1。2011—2012年每年发文不足50篇，主要分布于农林业遥感、生态环境监测、工程相关领域，其中农林业遥感为主要应用；2013—2016年每年发文量50～90篇，呈缓慢增长趋势；2017年发文193篇，比2016年发文量90篇增长114.44%，达2倍以上，主要是与航空施药技术相关的文章增长速度快；2018年发文量达241篇，2019年和2020年每年发文300篇以上。

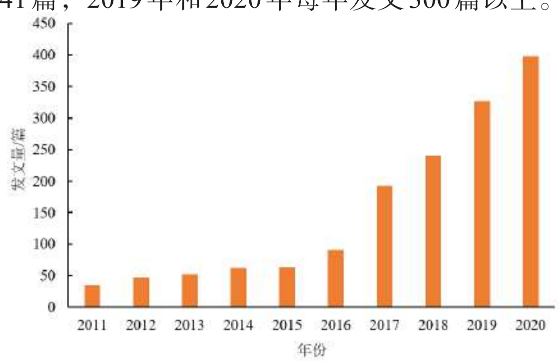


图1 2011—2020年无人机农林业应用领域年度发文量

Fig. 1 Annual number of papers published on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

分析近十年无人机农林业发展迅速的原因，主要包括：

（1）智慧农林业是当前研究热点，无人机农林业应用是智慧农林业的重要研究焦点。近十年来众多学者高度关注，参与无人机农林应用研究，发表了大量的文章，分享了宝贵的实践经验，加速无人机农林业应用发展。

（2）无人机软硬件技术发展迅速，尤其是芯片、电池、惯性传感器等的研发，以及飞控系统开源化应用，使无人机向小型化、低功耗方向发展，促进无人机在农林业领域的应用[37,38]。

（3）无人机农林应用优势突出，市场潜力巨大。无人机具有作业效率高、成本低、地形适应性强等优势，在农业劳动力日益短缺、规模化经营成为一种新趋势的背景下，无人机市场需求量大，成为市场关注的热点[9]。

（4）国家和地方为无人机农林应用提供政策支持。国家层面，中央1号文件多年聚焦三农，重视农业现代化建设；原农业部提出《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》；中央、地方联合出台无人机购置补贴，多种政策并举促进了无人机在农林上的广泛应用。

（5）资本市场青睐无人机潜在的广阔应用前景，强劲推动了无人机的发展，大规模无人机研发生产企业获得了充足资金，无人机研发生产速度加速[39]。

3.2 国家/地区影响力分析

基于WoS数据库文献计量分析显示全球已有较多研究机构、研究者开展了关于无人机在农林业领域的应用关键技术研究，近年来有关研究呈快速上升趋势。

3.2.1 总体分析

2011—2020年期间，全世界共有94个国家/地区在无人机领域发表了文章，发文20篇以上的国家/地区有23个（图2）。发文数量从多到少排名前五位的国家依次是美国（USA）、中国（China）、澳大利亚（Australia）、德国（Germany）和西班牙（Spain）。其中美国发文430篇，占发文量的28.51%；中国发文405篇，占26.86%；澳大利亚发文89篇，占5.90%；德国发文89篇，占5.90%；西班牙发文83篇，占5.50%。

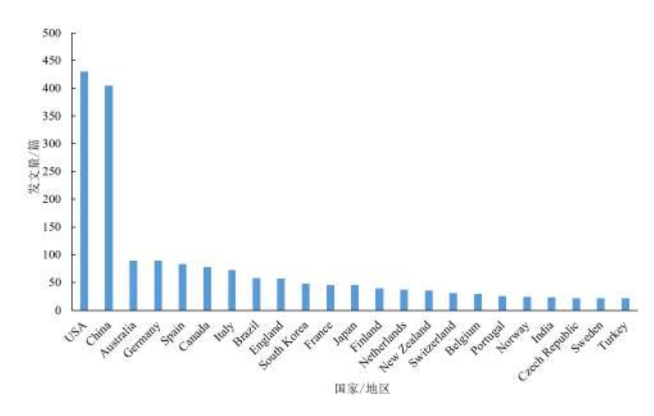


图2 2011—2020年不同国家/地区无人机农林业应用领域发文量

Fig.2 The number of published papers on UAV application in agriculture and forestry in different countries/ regions from 2011 to 2020

3.2.2 国家/地区影响力分析

被引次数更能客观反映文章的质量和影响力，文章被引次数从多到少排名前五位的国家依次是美国、中国、西班牙、澳大利亚和德国，其中美国发文总被引9940次、中国6216次、西班牙4744次、澳大利亚3155次、德国2970次，文章被引数量达300次以上的国家/地区有30个（图3）。从总体的发文数量、文章被引次数结果表明，中国和美国在农林业无人机应用研究方面具有显著的优势。

美国是世界上较早研制无人机的国家，在无人机技术发展、政府监管及民事应用领域均位居世界前列。美国出台了《2012联邦航空管理局现代化与改革法》（FAA Modernization and Reform Act）、《民用无人机系统融入国家空域系统路线图》（Integration of Civil Unmanned Aircraft Systems in the National Airspace System Roadmap）等政策和规章制度[40]，向民用无人机开放空域，并规范无人机的使用，推动无人机的发展应用。美国的无人机项目研究经费主要来源于美国自然科学基金、美国农业部、美国国家航空航天局等机构，重要的项目有美国国家航空航天局牵头的民用无人机融合计划（UAS in the NASProject）[38]。在相关政策、项目的支持下，美国2013年的发文量达到22篇，2017—2019年发文量达50篇以上，2020年发文量突破100篇，发文总量居世界领先地位。

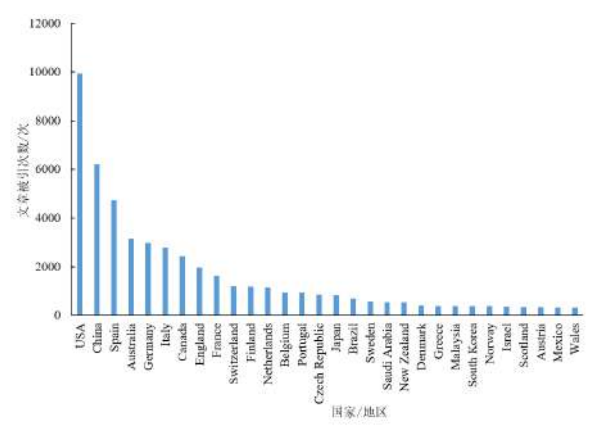


图3 2011—2020年不同国家/地区无人机农林业应用领域被引文献数量

Fig. 3 The number of cited papers on UAV application in agriculture and forestry in different countries / regions from 2011 to 2020

无人机在中国得到了政府、社会资本、研究机构的大力支持，较多科研团队投入无人机关键技术的研究，并积极应用于农林业生产中，发表了较多的SCI收录文章，在全世界产生了重要学术影响力。中国的农业农村部从2013年起开始在全国范围内推广无人机在农业上的应用技术[41]。2014年，中国成立“农业航空产业技术创新战略联盟”，中国工程院罗锡文院士担任理事长。在“中央1号文件”“到2020年化肥农药使用零增长行动方案”“无人机购置补贴”等国家政策和十三五国家重点研发计划项目“农业航空作业关键技术研究与装备研发”“地面与航空高工效施药技术及智能化装备”、国家自然基金“无人直升机施药雾滴在作物冠层的运动规律”“基于风场实时估算的无人直升机施药雾滴沉积区域精准控制模型研究”“植保无人机的农药雾化沉积高效利用”等项目的支持下，2013年中国开始发表无人机航空施药的相关文章。2016年无人机航空施药的文章占比达到无人机农林总发文量的30%以上。从2017年起，无人机农林业应用技术的研究科技论文数量达到40篇。2019—2020年中国发文量达120篇以上，呈现快速增加的趋势。

3.2.3 国家/地区发文合作分析

不同国家/地区科研优势不一样，开展不同国家/地区无人机农林业应用合作研究，可以实现优势互补，促进无人机在不同国家/地区更广泛的应用。基于VOSviewer进行分析，2011—2020年农林业无人机应用研究领域出现科研合作的国家/地区有92个，VOSviewer显示聚类数量为16类（图4）。

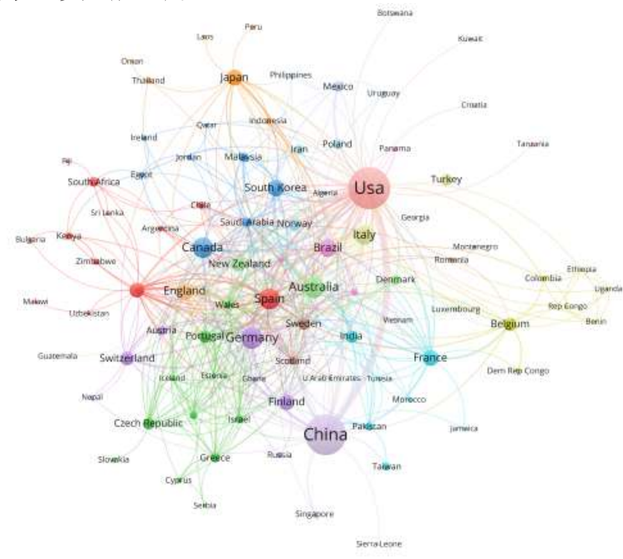


图4 2011—2020年无人机农林业应用领域发文国家/地区合作网络

Fig. 4 National/regional cooperation network of published papers on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

从图4中可以看出，中美联合研究发文数量稳居前列，说明两国科研联系密切，中美联合发文主要涉及无人机在植被遥感、航空施药领域开展合作。中国与德国、澳大利亚等国研究联合也较为紧密，主要开展无人机在航空施药领域的合作研究。美国与英国、西班牙等国合作较多，主要涉及无人机在生态环境科学、遥感领域的合作研究。另外，联合发文国家呈现明显的地域共通性特点，如东欧国家、东南亚国家、非洲国家之间的联合研究较为紧密，开展学术交流较多。

3.3 技术领域分布

无人机应用于农林业的研究涉及技术种类较多，将WoS检索数据结果与文献关键词、研究内容进行综合分析统计，文献成果发表所在期刊主要分布在70个技术研究领域，发文量从多到少排名前五的技术研究领域分别为遥感技术、生态环境科学、图像处理技术、地质科学和工程应用技术。其中遥感技术类期刊的文献656篇，占文献总量的43.50%；生态环境科学类期刊的文献547篇，占文献总量的36.27%；图像处理技术类期刊的文献484篇，占文献总量的32.10%，地质科学类期刊的文献399篇，占文献总量的26.46%，工程应用技术类期刊的文献268篇，占文献总量的17.77%。文献记录达20篇以上的期刊所属技术领域有20个（表1）。

从技术研究领域分布来看，无人机遥感应用涉及的技术研究领域较多，分布在遥感技术、生

表1 2011—2020年无人机农林业应用相关技术研究领域分析

Table 1 Research field on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

序号	研究领域	发文数量/篇	占发文总量的百分比/%
1	遥感技术	656	43.50
2	生态环境科学	547	36.27
3	图像处理技术	484	32.10
4	地质科学	399	26.46
5	工程应用技术	268	17.77
6	计算机科学	176	11.67
7	植物科学	158	10.48
8	自然地理学	125	8.29
9	化学	77	5.11
10	仪器仪表	57	3.78
11	水资源	52	3.45
12	科学技术其它专题	44	2.92
13	昆虫学	35	2.32
14	气象学大气科学	34	2.25
15	海洋淡水生物学	25	1.66
16	物理学	24	1.59
17	生物化学分子生物学	22	1.46
18	地球化学地球物理	22	1.46
19	电信	22	1.46
20	材料科学	21	1.39

态环境科学、图像处理技术、地质科学等，这说明无人机遥感研究涉及的技术问题不但与遥感技术本身有关，还与遥感对象的生态环境科学、地质科学特征性有关。无人机施药控制技术、飞行控制技术、传感器技术、流体计算建模技术等文献多出现在工程应用技术研究领域，体现了无人机施药技术研究工程化应用开发研究工作占比较大。

3.4 高被引文献及特征分析

将无人机应用于农林业的单篇文献被引用排名前10的文章列表见表2。分析可得，主要是无人机在农林业病虫害遥感、生态环境监测等方向应用的文章，其中2篇为综述文献，8篇为研究性文献，被引用最多的期刊为*Remote Sensing*。此刊是MDPI出版公司出版的遥感领域国际期刊，是开放获取出版的先驱。期刊近年来重视文章质量与创新性，影响因子持续上升，2020年影响因子达到4.848，学术界认可度高。

被引次数最多的文献是2014年Colomina和Molina[42]发表的关于摄影测量和遥感的无人机系统的综述性文献，被引次数达1157次。这篇文章阐明了无人机系统由无人机、地面控制站和通信数据链路组成，分析了无人机系统成为摄影测量和遥感研究热点的原因，回顾了无人机系统在摄影测量和遥感研究领域的发展历史，剖析了近年来无人机系统在摄影测量和遥感上的传感、导航、定位和通用数据处理等的发展现状，重点突出纳米微小型无人机系统。作者所在团队为西班牙加泰罗尼亚电信技术中心（Centre Tecnolog-

表2 2011—2020年无人机农林业应用领域文献被引量排名前10的文章

Table 2 Top 10 high cited papers on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

序号	文献作者	文献标题	期刊名称	文章类型	引用次数/次
1	Colomina和Molina[42]（2014）	Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing：A review	*Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*	综述	1157
2	Zhang和Kovacs[43]（2012）	The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture：A review	*Precision Agriculture*	综述	763
3	Watts等[44]（2012）	Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research：classification and considerations of use	*Remote Sensing*	研究	424
4	Turner等[45]（2012）	An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle（UAV）imagery，based on structure from motion（SfM）point clouds	*Remote Sensing*	研究	394
5	Niethammer等[46]（2012）	UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide：Evaluation and results	*Engineering Geology*	研究	365
6	Harwin和Lucieer[47]（2012）	Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle（UAV）imagery	*Remote Sensing*	研究	360
7	Pajares[48]（2015）	Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles（UAVs）	*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*	研究	309
8	Bendig等[49]（2014）	Estimating biomass of barley using crop surface models（CSMs）derived from UAV-based RGB imaging	*Remote Sensing*	研究	284
9	Zarco-tejada等[50]（2014）	Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle（UAV）and automatic 3D photo-reconstruction methods	*European Journal of Agronomy*	研究	283
10	D'oleire-oltmanns等[51]（2012）	Unmanned Aerial Vehicle（UAV）for monitoring soil erosion in Morocco	*Remote Sensing*	研究	273

ic de Telecomunicacions de Catalunya)，是专门从事通讯、工程电气电子、摄影测量、遥感等技术的研究团队，科研实力强，学术影响力大。2012年Zhang和Kovacs[43]发表了关于小型无人机精准农业应用的综述性文献，被引次数达763次。文章针对卫星遥感在精准农业上的应用成本高、难以在精准农业上大范围应用的问题，分析了小型无人机系统（Unmanned Aeriai System，UAS）在农业环境监测方面具有运营成本低、空间和时间分辨率高等特点，可应用于精准农业的产量评估、化学成分测量、长势制图、植被胁迫监测、施肥对作物增产评估等研究。同时指出无人机系统也存在着初始成本高、平台可靠性、传感器能力不足、缺乏用于大数据处理的标准化程序。但随着无人机平台技术的进步，应用成本将会降低，促进无人机的遥感技术在精准农业上的应用。作者所在单位为加拿大阿尔格玛大学（Algoma University）地理与地质学系，主要从事农林业生态遥感工作，在遥感领域具有较强的学术影响力。

分析表2中10篇高被引文章的主要特征有以下3点共同点：

（1）主要是综述类文章或基本方法类文章，具备被其它文章引用的工具性或背景性特点。

（2）文章发表期刊均为在高影响力期刊上，其中Q1区4篇，Q2区6篇，这些期刊发文量及被引量均较大。

（3）上述文章均发表于无人机农林业应用发表文章数量爆发式增长的前期，因此更容易获得广泛引用。

3.5 研究机构影响力分析

根据检索结果统计，2011—2020年间，全球在无人机于农林业应用研究领域发文的机构有1778个，其中发文5篇以上的机构有199个，发文量排名前10的机构见表3，其中包括中国机构6个、美国机构3个、西班牙机构1个。

表3 2011—2020年无人机农林业应用领域发文量排名前10的研究机构

Table 3 Top 10 paper output institutions on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

序号	研究机构英文名称	研究机构中文名称	国家/地区	发文数量/篇	发文量百分比/%
1	UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE USDA	美国农业部	美国	92	6.10
2	CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	中国科学院	中国	61	4.05
3	SOUTH CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY	华南农业大学	中国	46	3.05
4	TEXAS A&M UNIVERSITY	得州农工大学	美国	35	2.32
5	CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY	中国农业大学	中国	34	2.26
6	WUHAN UNIVERSITY	武汉大学	中国	33	2.19
7	FLORIDA STATE UNIVERSITY	佛罗里达州立大学	美国	32	2.12
8	CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS CSIC	西班牙最高科研理事会	西班牙	31	2.06
9	BEIJING ACADEMY OF AGRICULTURE AND FORESTRY SCIENCES	北京市农林科学院	中国	27	1.79
10	CHINESE ACADEMY OF AGRICULTURAL SCIENCES	中国农业科学院	中国	27	1.79

发文量最多的机构是美国农业部，发文92篇，占总发文量的6.10%，主要发表综合性无人机应用于农林业的文章，包括无人机病虫害遥感、无人机辅助育种、无人机果园施药、无人机施药灭蚊等；其次是中国科学院，发文61篇，占总发文量的4.05 %，内容主要涉及无人机飞行控制技术、无人机传感器技术、无人机遥感吊舱及图像处理技术等。中国发文量较多的主要科研机构还有华南农业大学、中国农业大学、武汉大学、北京市农林科学院、中国农业科学院等；美国发文量较多的主要研究机构还有得州农工大学和佛罗里达大学，西班牙发文量较多的研究机构

是西班牙最高科研理事会。

3.6 主要发文期刊分析

根据检索结果统计，2011—2020年全球共有398种期刊发表了与无人机农林业应用相关的文章。发文5篇以上的期刊有52种，共发文1021篇，占全部文献的67.71%，其中互被引网络见图5。

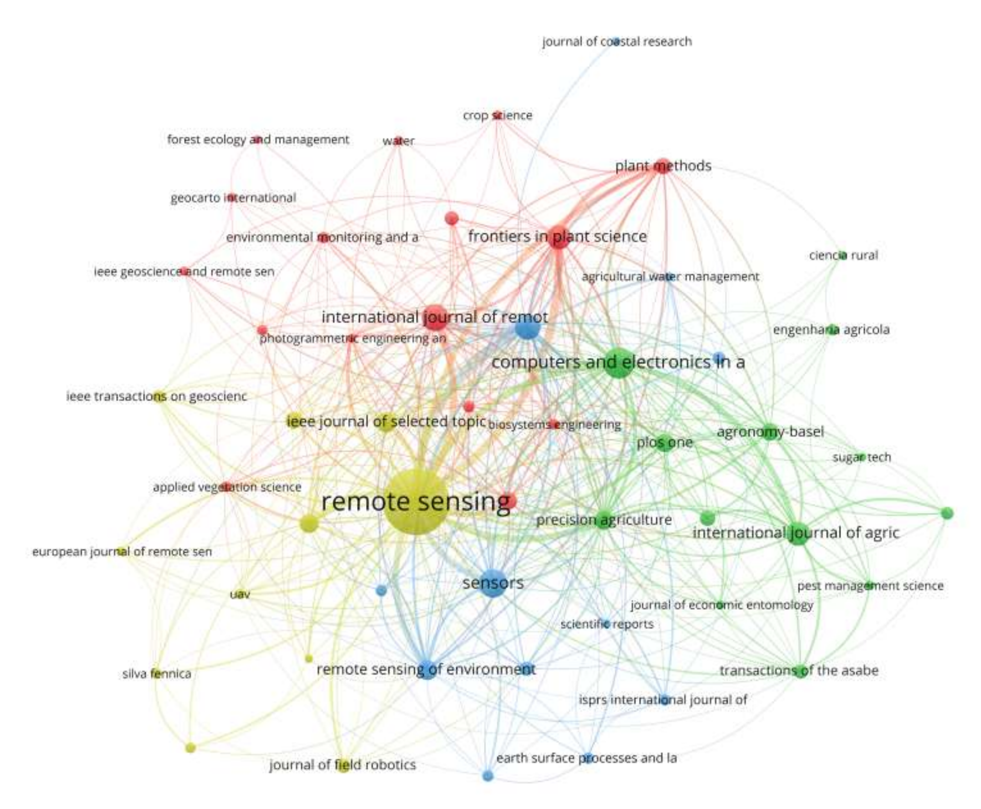


图5 2011—2020年无人机农林业应用领域发文5篇以上期刊被引网络图

Fig. 5 Citation network of journals with more than 5 papers publishing UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

期刊互被引聚为4类，第一聚类是以*International Journal of Remote Sensing*为核心的期刊互被引网络，主要发表基于无人机平台开展的农林业遥感研究工作；第二聚类是以*Computers and Electronics in Agriculture*为核心的期刊互被引网络，主要发表基于无人机平台开展的无人机施药、病虫害遥感等应用研究，以及无人机飞行参数、环境参数、作物冠层信息等交叉互作用关系的综合性基础研究工作；第三聚类是以*Sensors*为核心的期刊互被引网络，主要发表无人机飞行控制相关传感器研究、无人机农林业应用专用载荷传感器研究等方面工作；第四聚类是以*Remote Sensing*为核心的期刊互被引网络，主要发表基于无人机平台开展的农林业遥感研究工作。

上述几个研究领域是目前无人机农林业应用的最主要的研究热点，且相关期刊年发文总量大，发文周期较短，文章质量好，因此具备较大的发文量和引用量。发文量排名前10的期刊见表4，期刊主要分布在瑞士、美国、荷兰、英国、中国等国家，发文量排名最多的期刊是出版地在瑞士的*Remote Sensing*，发文277篇，影响因子为4.848，位于Q2区；影响因子最高的期刊是出版地在美国的*Remote Sensing of Environment*，影响因子为10.164，Q1区，发文25篇，排名第9。

表4 2011—2020年无人机农林业应用领域发文量排名前10期刊

Table 4 Top10 journals on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

序号	期刊名称	发文数量	总被引次数	出版地	影响因子	分区
1	*Remote Sensing*	277	8686	瑞士	4.848	Q2
2	*Computers and Electronics in Agriculture*	60	1383	英国	5.565	Q1
3	*Sensors*	51	532	瑞士	3.576	Q2
4	*International Journal of Remote Sensing*	46	753	英国	3.151	Q2
5	*Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*	42	2826	荷兰	8.979	Q1
6	*International Journal of Agricultural and Biological Engineering*	37	544	中国	2.032	Q2
7	*Frontiers in Plant Science*	36	979	瑞士	5.753	Q1
8	*IEEE Journal of Selected Topics In Applied Earth Observations and Remote*	26	532	美国	3.784	Q2
9	*Remote Sensing of Environment*	25	1125	美国	10.164	Q1
10	*Forests*	24	960	瑞士	2.633	Q1

4 研究热点分析

4.1 技术领域热点分析

关键词的准确性和频次是影响共现方法识别领域研究热点结果准确性的两个重要因素，本研究对文献中的关键词进行了大小写、单复数、全称与缩写、同义词合并等清洗整理[52]。检索得到的1508篇文献共有4160个关键词，共现频次达5次以上的关键词有133个。

排名前10的关键词及出现次数如表5所示。

表5 2011—2020年无人机农林业应用领域共现次数排名前10的关键词

Table 5 Top 10 co-occurrence key words on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

序号	关键词	中文翻译	共现次数/次
1	UAV	无人机	628
2	remote sensing	遥感	376
3	UAS	无人机系统	88
4	precision agriculture	精准农业	70
5	lidar	雷达	61
6	machine learning	机器学习	51
7	photogrammetry	摄影测量	49
8	aerial spraying	航空施药	43
9	deep learning	深度学习	39
10	deposition	沉积	36

无人机农林业应用领域关键词研究结果表明，学者关注最多的是无人机软硬件平台，软件方面侧重于无人机控制系统，硬件方面侧重于雷达在探测、避障等方面应用；无人机农林业应用中，主要应用于遥感、摄影测量、航空施药等方面，机器学习、深度学习是无人机图像处理的重要方法。

基于VOSviewer构建共现5次以上关键词网络，共聚为8类（图6）。

从关键词的聚类结果可以看出无人机在农林业的主要应用在精准农业（#3聚类）和林业（#4聚类）方面，技术应用层面研究热点主要包括无人机在植物表型（#1聚类）、病虫害遥感（#2聚类）、无人机施药（#5聚类）等方面的研究，无人机软硬件系统主要开展无人机控制系统方面的研究（#6聚类）。红色区域为在植物表型获取上的应用（#1聚类），共有26个关键词，主要研究应用高光谱遥感获取植物表型信息，基于叶面积指数、植被指数开展水稻、大豆、草地等的生物量和产量估算。绿色区域为无人机在遥感方面的应用（#2聚类），共有24个关键词，主要研究基于红外热成像、高光谱成像开展小麦、玉米等的遥感研究，获取归一化植被指数，分析植被冠层温度、叶绿素含量等，构建小麦、玉米等的无人机遥感应用系统。紫色区域为基于无人机的精准施药技术研究（#5聚类），共有14个关键词，主要研究无人机施药的雾滴沉积、漂移控制等相关关键问题。浅蓝色区域为无人机控制系统的研究（#6聚类），共有14个关键词，主要研究路径自主规划、主动避障、自主巡航等，提高无人机作业的效率和精准性。

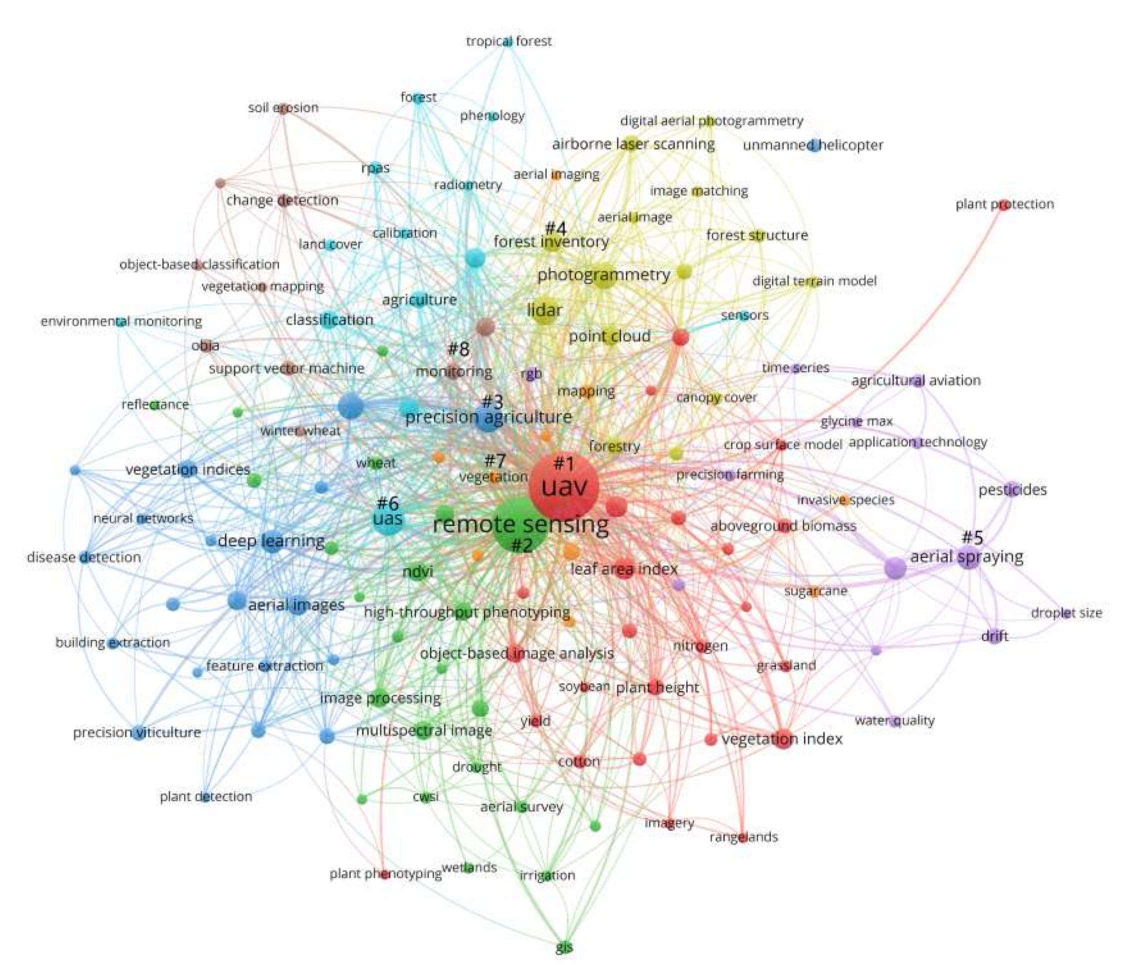


图6 2011—2020年无人机农林业应用领域关键词聚类图

Fig.6 Key words cluster network on UAV application in agriculture and forestry from 2011 to 2020

4.2 应用特点分析

通过进一步聚类，分析农业、林业不同领域的文献关键词，挖掘无人机在农林业不同领域的应用特点。

4.2.1 农业领域应用关键词聚类分析

无人机在农业领域应用关键词主要聚为3类，包括农业遥感、精准农业和航空施药（图7），主要关键词有UAV（无人机）、remote sensing（遥感）、deposition（沉积）、system（系统）和precision agriculture（精准农业）等。基于无人机的农业遥感主要发挥无人机作业频率高、作业适应性强的优势进行多时相的农作物冠层、生长状况、含氮量等信息的获取，基于图像处理获取不同类别与结构的农作物的光谱反射信号区别，进而获得作物水、肥、病虫害等信息，为后续指导品种选育提供基础；无人机在精准农业上的应用主要为机器学习处理无人机获取的图像，获得叶面积指数、归一化植被指数等，对农作物生物量和产量等进行估计，为后续开展精准施药施肥作业提供数据支持；无人机在农业领域最主要的应用是精准施药，包括开展药液在作物冠层内部的穿透及在作物叶片的沉积研究，也包括对无人机下洗风场和环境风场作用下的雾滴漂移问题的研究，为提升无人机施药效率，减少环境污染及药害提供技术支撑。

4.2.2 林业领域应用关键词聚类分析

无人机在林业领域应用关键词主要聚为2类，包括无人机用于森林资源调查和森林健康状况遥感（图8），主要关键词有UAV（无人机）、

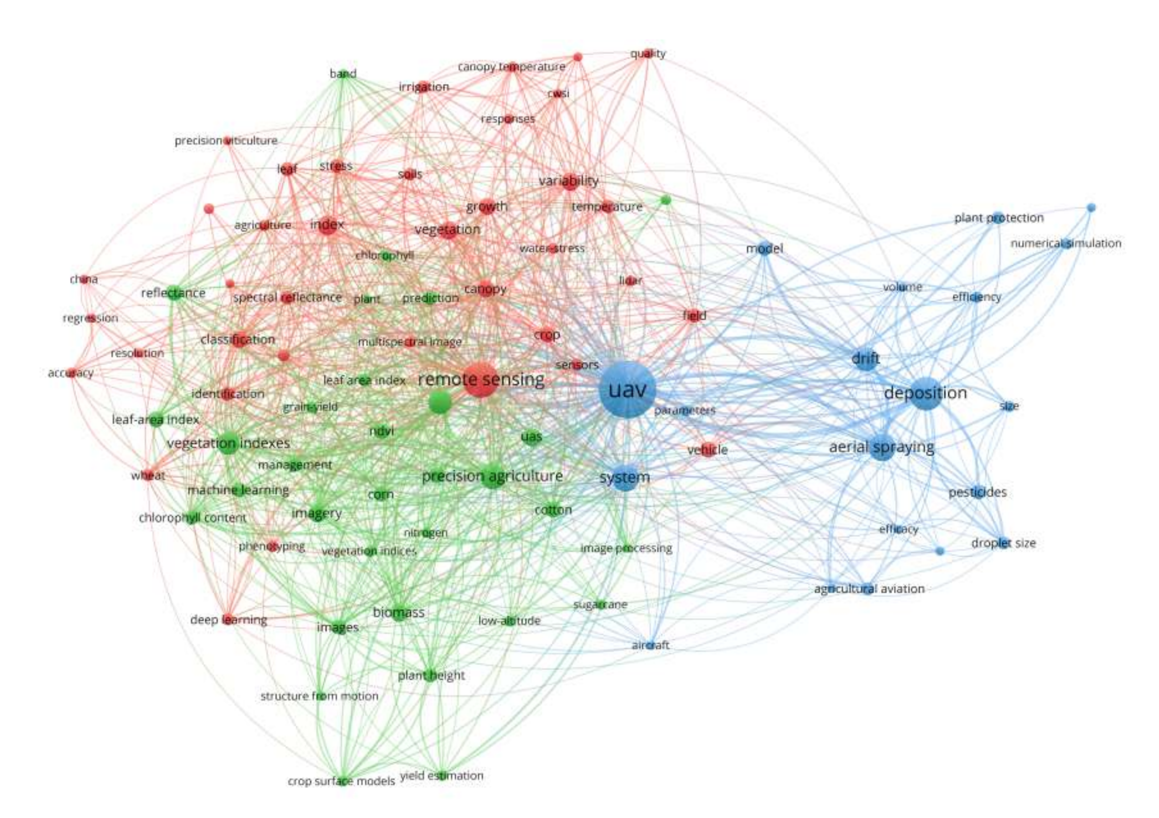


图 7　2011—2020 年无人机在农业领域应用研究关键词聚类图

Fig. 7 Key words cluster network on UAV application in agriculture from 2011 to 2020

remote sensing（遥感）、forest inventory（森林调查）、classification（分类）和 lidar（雷达）等。无人机在林业领域主要用于森林资源调查和森林健康状况的遥感等方面，森林资源调查主要是无人机进行森林冠层结构、高度、木材蓄积量等信息的获取；森林健康状况的遥感是无人机在林业领域应用的重点，森林地形复杂，树木高大，人工调查费时费力，无人机可进行森林病虫害监测、火灾监测；病虫害监测主要包括松材线虫病、柑橘黄龙病等。无人机在农业领域的应用较林业更加广泛，主要是由于林业地形、气候比农田更加复杂，需要不断探索适合林地的无人机技术和设备。

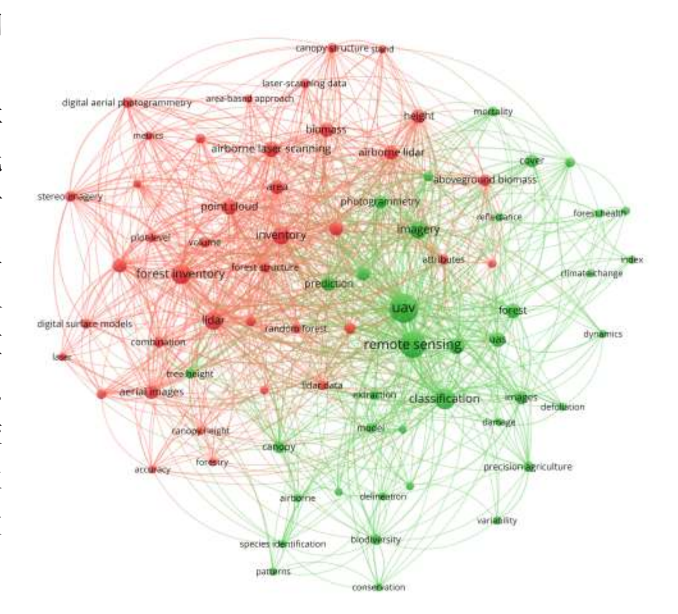


图 8　2011—2020 年无人机在林业领域应用研究关键词聚类图

Fig.8 Key words cluster network on UAV application in forestry from 2011 to 2020

4.3 存在的不足

4.3.1　无人机农林应用技术方面

从关键词的共现频次可以看出无人机在农林业领域主要应用于地面植被遥感和航空施药等方面，无人机在农林业的应用突破了地面机械施药的局限性，极大提高了农林业遥感监测和农药喷洒的作业效率。无人机及其控制系统是近些年在

农林业热门应用的新技术，在应用上还存在需改进的地方，在遥感信息获取方面存在地表干扰物多，缺乏多源信息的融合处理，病虫害发生程度、植被长势状况判断准确率还有待提高，亟需探索新型多源信息融合方式进行作物病虫害的反演，提高反演信息准确率，逐步探索基于遥感信息的作物长势中长期预测手段，为农事管理提供早期的决策依据。

在无人机施药方面主要存在缺乏精准施药控制装置、施药效果质量评价体系等，造成农药浪费与环境污染。在喷药装置方面进一步优化无人机专用雾化器械，探索创新性的雾滴形成机制，研发窄雾滴粒径谱的精准施药控制装置和响应器械，形成精准粒径谱控制技术及装置；在无人机施药效果评价方面推进实时监测评估技术的研究，引入新型传感探测手段，运用人工智能和机器学习方法，对施药过程中环境、药剂[53-55]、气象[56]、机型、风场类型[57]等信息进行综合分析，获取实时药剂雾滴沉积特性和作业质量的数字化评价描述，提高无人机的施药效率与安全性。

4.3.2　无人机农林应用环境方面

无人机农林应用环境方面主要存在作业空域受限、缺乏相关技术标准等不足。由于空域的管理，无人机农林作业的地域受到一定的限制，不利于无人机农林应用的发展，无人机农林应用的空域有待进一步放宽。与快速发展的无人机技术相比较，无人机农林应用缺乏作业规范、防治效果评价等相关标准，无法为无人机在不同天气、地域等条件下提供作业参数指导，缺乏防治效果评价标准无法对无人机航空施药效果进行客观判断。无人机农林应用的标准有待及早制定。

5　结论与展望

本研究通过检索2011—2020年WoS核心合集数据库关于无人机农林业应用1508篇研究文献，应用VOSviewer软件、WoS分析工具、Microsoft Excel软件结合进行科学计量分析，通过对年度发文情况，即发展历程、国家/地区影响力、技术领域分布、研究机构影响力、发文期刊以及研究热点、特点和不足等进行剖析，获取无人机应用于农林业领域的全球科研态势，为无人机在农林业上的创新研究、科研团队之间的合作提供参考。得出如下结论：

（1）从2017年开始无人机在农林业领域应用的发文数量呈现快速增加的趋势；全球有94个国家/地区、1778个机构开展了无人机在农业领域应用的研究，发文量前3名的国家为美国、中国和澳大利亚，分别发文430、405和89篇；发文量最多的机构是美国农业部，发文92篇，其次是中国科学院，发文61篇；398种期刊发表了与无人机应用于农林业的相关文章；被引次数最多的是2014年发表于*Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*上的文章Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing： A review，被引次数达1157次；发文量最多的期刊是*Remote Sensing*，共277篇。

（2）近十年来，无人机农林业应用得到了政府的大力支持、研发机构的广泛关注与投入、社会资本等的推动，无人机软硬件技术发展迅速，无人机农林应用成为智慧农业的研究热点。联合发文国家呈现明显的地域共通性特点，发文数量与国家政策、科研项目、研发机构投入科研实力等息息相关，美国、中国发文数量位居世界前列，在全世界产生了重要学术影响力。遥感是无人机农林应用最多的技术领域，主要涉及遥感技术、生态环境科学、图像处理技术、地质科学等多技术研究；工程是无人机农林应用重要的技术领域，主要涉及与无人机航空施药相关的控制技术、传感器技术、流体计算建模技术等研究。文章被引数量与文章类别、期刊影响力等相关性大，综述类文章被引数量大，高影响力期刊发文及被引量均较大。发文量排名前10的期刊主要分布在瑞士、美国、荷兰、英国、中国等国家/地区，侧重于发表无人机农林业应用的遥感、航空施药等研究热点相关的文章，期刊年发文总量

多、被引数量大。

（3）无人机应用于农林业领域的研究热点有无人机施药、无人机病虫害遥感、植物表型获取，无人机在农业领域的应用主要包括农业遥感、精准农业和航空施药三大方面，航空施药是无人机在农业上的主要应用，研究重点是药液在作物冠层的穿透、沉积、漂移问题；无人机在林业领域的应用主要包括森林资源调查、森林健康状况的遥感，森林健康状况的遥感是无人机在林业上的应用重点，主要进行森林病虫害、火灾等的监测。无人机在农业上的应用范围较林业广泛，随着无人机应用技术的深入研究，无人机在林业领域的应用也日趋成熟。

（4）无人机突破了传统地面机械作业存在的效率不够高、复杂地形难以应用等的局限性，无人机在中国的农林业领域具有广阔的推广应用前景，但也存在续航时间短、航空施药药液漂移、植被遥感精度不够高等不足，未来需进一步提升无人机在复杂农林业环境中的作业水平，尤其是提升无人机自主作业水平，实现农业无人机作业自主调度、自主任务规划、自主实施、自主加药的全天 24 小时作业能力，提高无人机在农林业领域的应用效率，加速助推中国智慧农林业的发展。

此外，本研究采用的 WoS 数据库选取的期刊以英语期刊为主，无法检索到非英语的文章，要想了解无人机在中国等非英语国家农林业的总体研究现状，还需借助其它数据库进行联合分析，从而获得更加客观和全面的结论。

参考文献：

[1] 问延安. 基于知识图谱的国际无人机研究可视化分析[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2018, 36(6): 16-25, 93.
WEN Y. Visualization analysis of international UAV research based on knowledge map[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, 2018, 36(6): 16-25, 93.

[2] 徐旻, 张瑞瑞, 陈立平, 等. 智能化无人机植保作业关键技术及研究进展[J]. 智慧农业, 2019, 1(2): 20-33.
XU M, ZHANG R, CHEN L, et al. Key technology analysis and research progress of UAV intelligent plant protection[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(2): 20-33.

[3] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.
ZHANG D, LAN Y, CHEN L, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(10): 53-59.

[4] FAICAL B, FREITAS H, GOMES P, et al. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017,138: 210-223.

[5] 张瑞瑞, 李龙龙, 文瑶, 等. 植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 47-55.
ZHANG R, LI L, WEN Y, et al. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 47-55.

[6] TAO H, FENG H, XU L, et al. Estimation of crop growth parameters using UAV-Based hyperspectral remote sensing data[J]. Sensors, 2020, 20(5): ID 1296.

[7] GAO D, SUN Q, HU B, et al. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on Internet-of-Things and unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2020, 20: ID 1487.

[8] 何雄奎. 我国植保无人机的研究与发展应用浅析[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(9): 10-17.
HE X. Brief analysis on the research,development and application of plant protection UAV in China[J]. Pesticide Science and Administration, 2018, 39(9): 10-17.

[9] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019,40(5) 217-225.
LAN Y, CHEN S, DENG J, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 217-225.

[10] 张俊, 廉勇, 杨志刚, 等. 植保无人机发展历程、优缺点分析及应用前景[J]. 现代农业, 2020(4): 4-7.
ZHANG J, LIAN Y, YANG Z, et al. Development history, advantages and disadvantages analysis and application prospect of plant protection UAV[J]. Modern agriculture, 2020(4): 4-7.

[11] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 航空喷施与人工喷施方式对水稻施药效果比较[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(4):103-109.

CHEN S, LAN Y, LI J, et al. Comparison of the pesticide effects of aerial and artificial spray applications for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(4): 103-109.

[12] KHARIM M, WAYAYOK A, SHARIFF A, et al. Droplet deposition density of organic liquid fertilizer at low altitude UAV aerial spraying in rice cultivation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: ID 105045.

[13] 陈豪明, 周宇杰, 骆琴, 等. 植保无人机全程解决水稻病虫草害效果评价[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 97-101.
CHEN H, ZHOU Y, LUO Q, et al. Evaluation of the effect of plant protection UAV on rice diseases, insect pests and weeds[J]. China Rice, 2020, 26(5): 97-101.

[14] CHEN P, LAN Y, HUANG X, et al. Droplet deposition and control of planthoppers of different nozzles in two-stage rice with a quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. Agronomy-Basel, 2020,10: ID 14.

[15] QIN W, XUE X, ZHANG S, et al. Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11: 27-32.

[16] MENG Y, LAN Y, MEI G, et al. Effect of aerial spray adjuvant applying on the efficiency of small unmanned aerial vehicle for wheat aphids control[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11: 46-53.

[17] WANG G, LAN Y, YUAN H, et al. Comparison of spray deposition, control efficacy on wheat aphids and working efficiency in the wheat field of the unmanned aerial vehicle with boom sprayer and two conventional knapsack sprayers[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9: ID 218.

[18] WANG G, LAN Y, QI H X, et al. Field evaluation of an unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer: Effect of spray volume on deposition and the control of pests and disease in wheat[J]. Pest Management Science, 2019, 75: 1546-1555.

[19] TAO H, FENG H, XU L, et al. Estimation of the yield and plant height of winter wheat using UAV-based hyperspectral images[J]. Sensors, 2020, 20: ID 1231.

[20] ZHANG X, LIANG Y, QIN Z, et al. Application of multi-rotor unmanned aerial vehicle application in management of stem borer (*lepidoptera*) in sugarcane[J]. Sugar Tech, 2019, 21: 847-852.

[21] ZHANG X, SONG X, LIANG Y, et al. Effects of spray parameters of drone on the droplet deposition in sugarcane canopy[J]. Sugar Tech, 2020, 22: 583-588.

[22] ZHENG Y, YANG S, ZHAO C, et al. Modelling operation parameters of UAV on spray effects at different growth stages of corns[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10: 57-66.

[23] HAN L, YANG G, YANG H, et al. Clustering field-based maize phenotyping of plant-height growth and canopy spectral dynamics using a UAV remote-sensing approach[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: ID 1638.

[24] HAN L, YANG G, DAI H, et al. Fuzzy clustering of maize plant-height patterns using time series of UAV remote-sensing images and variety traits[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: ID 926.

[25] 田新湖, 陈益生, 肖灿荣, 等. 植保无人机施药对玉米草地贪夜蛾的防治效果[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(1): 48-53.
TIAN X, CHEN Y, XIAO C, et al. Control efficacy of plant protection UAV spraying against fall armyworm in maize field[J]. Pesticide Science and Administration, 2020, 41(1): 48-53.

[26] LOU Z, XIN F, HAN X, et al. Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites[J]. Agronomy-Basel, 2018, 8(9): ID187.

[27] NAHIYOON S, CUI L, YANG D, et al. Biocidal radiuses of cycloxaprid, imidacloprid and lambda-cyhalothrin droplets controlling against cotton aphid (*Aphis gossypii*) using an unmanned aerial vehicle[J]. Pest Management Science, 2020, 76: 3020-3029.

[28] ZHANG P, DENG L, LYU Q, et al. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9: 45-52.

[29] TANG Y, HOU C, LUO S, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1-7.

[30] MARTINEZ-GUANTER J, AGUERA P, AGUERA J, et al. Spray and economics assessment of a UAV-based ultra-low-volume application in olive and citrus orchards[J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 226-243.

[31] 张瑞瑞, 夏浪, 陈立平, 等. 基于U-Net网络和无人机影像的松材线虫病变色木识别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 61-68.
ZHANG R, XIA L, CHEN L, et al. Recognition of wilt wood caused by pine wilt nematode based on U-Net network and unmanned aerial vehicle images[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 61-68.

[32] YU R, LUO Y, ZHOU Q, et al. Early detection of pine wilt disease using deep learning algorithms and UAV-

based multispectral imagery[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 497: ID 119493.
[33] 付健, 丁敬达. Citespace和VOSviewer软件的可视化原理比较[J]. 农业图书情报, 2019, 31(10): 31-37.
FU J, DING J. Comparison of visualization principles between Citespace and VOSviewer[J]. Agricultural Library and Information, 2019, 31(10): 31-37.
[34] VAN ECK N J, WALTMAN L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. Scientometrics, 2010, 84(2): 523-538.
[35] Web of ScienceTM 核心合集引文索引导航学术之路[EB/OL]. [2021-06-07]. https://solutions.clarivate.com.cn/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/08/Webof -Science20210726.pdf.
[36] 孔繁秀, 赵艳萍. 基于Web of Science核心合集的西藏民族大学自然科学论文产出统计及分析[J]. 西藏民族大学学报(哲学社会科学版), 2018, 39(5): 174-182.
KONG F, ZHAO Y. Statistics and analysis of natural science papers output of Xizang Minzu University based on Web of Science core collection[J]. Journal of Xizang Minzu University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2018, 39(5): 174-182.
[37] 薛雷, 戴大双. 基于知识图谱的产品质量研究可视化分析[J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2020,19(2): 65-71.
XUE L, DAI D. Visual analysis of product quality research based on knowledge map[J]. Journal of Dalian Maritime University (Social Science Edition), 2020,19(2): 65-71.
[38] 王炼. 美国民用无人机产业发展现状及联邦推进措施[J]. 全球科技经济瞭望, 2017, 32(10): 18-23.
WANG L. Civil UAS industry development and government promotion measures in the US[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2017, 32(10): 18-23.
[39] 何志辉, 何雄奎, 任延昭. 植保无人机为何在我国得到迅猛发展[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(1): 19-22.
HE Z, HE X, REN Y. Why plant protection UAV develops rapidly in China[J]. Pesticide Science and Administration, 2020, 41(1): 19-22.
[40] US CONGRESS. FAA modernization and reform act[Z/OL]. [2017-02-14]. https://www.faa.gov/uas/media/Sec_331_336_UAS.pdf.
[41] 何雄奎. 我国植保无人机的研究与发展应用浅析[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(9):10-17.
HE X. Brief analysis on the research,development and application of plant protection UAV in China[J]. Pesticide Science and Administration, 2018, 39(9):10-17.
[42] COLOMINA I, MOLINA P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 92: 79-97.
[43] ZHANG C, KOVACS J. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(6): 693-712.
[44] WATTS A, AMBROSIA V, HINKLEY E. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use[J]. Remote Sensing, 2012, 4: 1671-1692.
[45] TURNER D, LUCIEER A, WATSON C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds[J]. Remote Sensing, 2012, 4: 1392-1410.
[46] NIETHAMMER U, JAMES M, ROTHMUND S, et al. UAV-based remote sensing of the super-sauze landslide: Evaluation and results[J]. Engineering Geology, 2012, 128: 2-11.
[47] HARWIN S, LUCIEER A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery[J]. Remote Sensing, 2012, 4: 1573-1599.
[48] PAJARES G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2015, 81: 281-329.
[49] BENDIG J, BOLTEN A, BENNERTZ S, et al. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging[J]. Remote Sensing, 2014, 6: 10395-10412.
[50] ZARCO-TEJADA P, DIAZ-VARELA R, ANGILERI V, et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 55: 89-99.
[51] D'OLEIRE-OLTMANNS S, MARZOLFF I, PETER K D, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco[J]. Remote Sensing, 2012, 4: 3390-3416.
[52] 潘玮, 郑鹏, 黄锦泉, 等. 基于数据清洗"DEAN"流程的健康信息领域研究热点探测[J]. 现代情报, 2018, 38(10): 73-77.
PAN W, ZHENG P, HUANG J, et al. Research hotspot detection of health information based on the "deanprocess" of data clean[J]. Journal of Modern Information, 2018, 38(10): 73-77.
[53] TANG Q, ZHANG R, CHEN L, et al. Droplets movement and deposition of an eight-rotor agricultural UAV

in downwash flow field[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10: 47-56.
[54] TANG Q, ZHANG R, CHEN L, et al. Numerical simulation of the downwash flow field and droplet movement from an unmanned helicopter for crop spraying[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: ID 105468.
[55] CHEN S, LAN Y, ZHOU Z, et al. Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV[J]. Agronomy-Basel, 2020, 10: ID 195.
[56] WANG J, LAN Y, ZHANG H, et al. Drift and deposition of pesticide applied by UAV on pineapple plants under different meteorological conditions[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11: 5-12.
[57] TANG Q, ZHANG R, CHEN L, et al. High-accuracy, high-resolution downwash flow field measurements of an unmanned helicopter for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: ID 105390.

Investigation on Advances of Unmanned Aerial Vehicle Application Research in Agriculture and Forestry

CHEN Meixiang[1,2,3], ZHANG Ruirui[1,2,3], CHEN Liping[1,2,3*], TANG Qing[1,2,3], XIA Lang[1,2,3]

（1. *National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*; 2. *Research Center for Intelligent Equipment*, *BAAFS, Beijing* 100097, *China*; 3. *National Center for International Research on Agricultural Aerial Application Technology*, *Beijing* 100097, *China*）

Abstract: Unmanned Aerial Vehicle(UAV) application in agriculture and forestry has the unique advantages of high efficiency, water and pesticide saving, and strong adaptability to complex terrain. The application research of UAV in agriculture and forestry has shown a fast growing trend. In order to explore the research hotspots and the scientific impact of countries/regions and institutions on UAV application in agriculture and forestry, the relevant literatures in the Web of Science(WoS) core collection database (2011—2020) were collected. The bibliometrics analysis was performed on the journal articles of UAV application in agriculture and forestry based on VOSviewer, WoS analysis tools and Microsoft Excel. The analysis results showed that the number of published papers increased rapidly since 2017, the researches on UAV application in agriculture and forestry were carried out in 94 countries/regions, including1778 institutions. Due to the strong scientific research group in the application of UAV in agriculture and forestry of the United States, China and Australia, a large number of papers had been published, resulting in a great academic influence. Remote sensing was the most widely used technology field of UAV application in agriculture and forestry, mainly involving remote sensing technology, ecological environment science, image processing technology, geological science, etc. Engineering was an important technical field of UAV application in agriculture and forestry, mainly involving control technology, sensor technology and fluid computing modeling technology related to UAV aerial pesticide application. There were 1508 articles and reviews been published in 398 journals, about 1.90% of all journals included in WoS core collection database, indicating that more and more journals paid attention to the application research of UAV in agriculture and forestry. *Remote Sensing* sponsored by MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) was the journal that published the most of papers, the most cited paper mainly focused on the research status of UAV system in photogrammetry and remote sensing, including sensing, navigation, positioning and general data processing, etc. In addition, the analysis of the research hotspots of UAV application in agriculture and forestry showed that UAV pesticide application, UAV remote sensing of diseases and pests, plant phenotype acquisition were the research hotspots. This study can provide references for innovation research and cooperation between research teams of UAV application in agriculture and forestry.

Key words: UAV; Web of Science; bibliometrics; VOSviewer; research situation; remote sensing; plant phenotype